



DFW

PATENTS

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

APPLICANT: FLORIAN TAUSER ET AL. - 1
SERIAL NO.: 10/787,000 GROUP: 3663
FILED: FEBRUARY 25, 2004
TITLE: FIBER-OPTIC AMPLIFICATION OF LIGHT PULSES

CLAIM OF PRIORITY

MAIL STOP AMENDMENTS
Commissioner of Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sir:

Applicants herewith claim the benefit of priority of their earlier-filed application under the International Convention in accordance with 35 U.S.C. 119. Submitted herewith is a certified copy of the German application having the Serial No. 10 2004 009 068.8, bearing the filing date of February 23, 2004. A certified copy of Applicants' other priority application, German application having the Serial No. 103 08 249.2 filed February 25, 2003, was submitted with our Response to Notice to File Missing Parts mailed June 10, 2004.

It is hereby requested that receipt of this priority document be acknowledged by the Patent Office.

Respectfully submitted,
FLORIAN TAUSER ET AL. - 1

COLLARD & ROE, P.C.
1077 Northern Boulevard
Roslyn, New York 11576
(516) 365-9802
FJD/jc

Allison C. Collard, Reg.No.22,532
Edward R. Freedman, Reg.No.26,048
Frederick J. Dorchak, Reg.No.29,298
Attorneys for Applicants

Enclosure: Certified Copy of German Priority Document

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the U.S. Postal Service as first class mail in an envelope addressed to: Commissioner of Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450, on June 17, 2004.

Maria Guastella

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 10 2004 009 068.8

Anmeldetag: 23. Februar 2004

Anmelder/Inhaber: TOPTICA Photonics AG, 82152 Planegg/DE

Bezeichnung: Faseroptische Verstärkung von Lichtimpulsen

Priorität: 25. Februar 2003 DE 103 08 249.2

IPC: H 01 S, G 02 F, H 04 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 24. Mai 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Walner

Faseroptische Verstärkung von Lichtimpulsen

- 5 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Verstärkung von Lichtimpulsen, mit einem optischen Strecker, in welchem die Lichtimpulse einer gepulsten Laserlichtquelle zeitlich gestreckt werden, und mit einer optisch gepumpten Verstärkerfaser, in welcher die Lichtimpulse verstärkt und zeitlich komprimiert werden.
- 10 Lasersysteme, die in der Lage sind, Femtosekunden-Lichtimpulse zu erzeugen, werden in der physikalischen Grundlagenforschung und auch in anderen Forschungsgebieten zunehmend angewendet. Mit derartigen Lasersystemen können schnelle physikalische, chemische und biologische Prozesse quasi in "Echtzeit" beobachtet werden. Kommerzielle Einsatzfelder für Femtosekunden-
- 15 Lichtimpulse erzeugende Lasersysteme bestehen auf den Gebieten der Materialuntersuchung und -bearbeitung, auf dem Gebiet der Medizin sowie auf dem so genannten "Life-Science"-Gebiet. Als konkrete Anwendungen sind die Multi-Photonen-Mikroskopie sowie die optische Kohärenz-Tomographie beispielhaft zu nennen.
- 20 Vor wenigen Jahren ist außerdem die Verwendung von phasenstabilisierten Lasersystemen zur Erzeugung von Femtosekunden-Lichtimpulsen als hochgenaue Frequenznormale bekannt geworden. Dies ermöglicht beispielsweise die hochgenaue Vermessung von optischen Übergängen. Durch eine direkte Verknüpfung des optischen Spektralbereiches mit den derzeit
- 25 genauesten Uhren im Bereich der Mikrowellen- bzw. Radiofrequenzen ersetzen solche Systeme aufwendige und kostspielige Frequenzteilerketten. Auch auf

dem Gebiet der optischen Frequenzmetrologie gibt es also interessante Anwendungsfelder für Femtosekunden-Lichtimpulse erzeugende Lasersysteme.

Passiv modengekoppelte Glasfaser-Lasersysteme, die Lichtimpulse mit Impulsdauern von ≤ 100 Femtosekunden liefern, sind seit mehreren Jahren bekannt und in optischen Laboren etabliert. Faserbasierte Lasersysteme haben den Vorteil einer besonders hohen Kosteneffizienz und eines sehr geringen Wartungs- und Justageaufwands. Außerdem lassen sich gegenüber Freistrahllasersystemen äußerst kompakte Aufbauten realisieren. Bei den faserbasierten Systemen kommen als laseraktives Medium üblicherweise mit seltenen Erden dotierte optische Fasern zum Einsatz. Bei der Verwendung von mit Erbium-
10 dotierten Fasern ergibt sich eine Emissionswellenlänge im Bereich von $1,55 \mu\text{m}$. Vorteilhafterweise sind Lasersysteme, die in diesem Wellenlängenbereich emittieren, kompatibel zu einer Vielzahl von optischen Komponenten, die im Bereich der Telekommunikationstechnik Anwendung
15 finden. Es ist allerdings festzustellen, dass faserbasierte Lasersysteme hinsichtlich der erreichbaren Impulsdauer und Impulsenergie gegenüber den bekannten Titan-Saphir-Freistrahllasersystemen Nachteile haben. Bei Impulsdauern von ≤ 100 Femtosekunden sind mit rein faserbasierten Lasersystemen derzeit Impulsenergien von nur etwa 100 Pikojoule zu erreichen.
20 Die damit verknüpfte vergleichsweise niedrige Lichtintensität ist aber für viele Anwendungen, insbesondere auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik, nicht ausreichend.

Es hat sich daher gezeigt, dass es zur Erzielung von Impulsenergien von einem Nanojoule und mehr erforderlich ist, die von bekannten faserbasierten
25 Lasersystemen gelieferten Lichtimpulse weiter zu verstärken. Eine hierzu geeignete Vorrichtung ist beispielsweise aus der US 5,880,877 vorbekannt. Bei dem vorbekannten System kommt eine optisch gepumpte Verstärkerfaser zum Einsatz, in welcher die von einer gepulsten Laserlichtquelle gelieferten Lichtimpulse verstärkt werden. Dabei hat die
30 Verstärkerfaser in dem entsprechenden Wellenlängenbereich eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion. Die dadurch geförderten solitonischen optischen Effekte werden bei dem vorbekannten System ausgenutzt, um Lichtimpulse mit extrem kurzer Impulsdauer im Bereich von 30 Femtosekunden

zu generieren. Problematisch ist, dass die entstehenden Solitonen zwar eine kurze und intensive Spitze aufweisen, wobei allerdings zeitlich weit ausgedehnte Impulsflügel entstehen, auf die ein beträchtlicher Anteil der gesamten Impulsenergie entfällt. Um diese unerwünschte zeitliche Impulsform zu beseitigen, kommt bei dem vorbekannten System ein Frequenzverdoppler zum Einsatz, bei welchem es sich um ein Medium mit nichtlinearen optischen Eigenschaften handelt. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Intensität tragen die erwähnten Impulsflügel zu dem frequenzverdoppelten Lichtimpuls nicht bei, sodass insgesamt eine Bereinigung der zeitlichen Impulsform erzielt wird. Ein wesentlicher Nachteil des vorbekannten Systems ist zum einen, dass mit der Frequenzverdopplung ein erheblicher Energieverlust unvermeidbar verbunden ist. Außerdem verlässt die Wellenlänge der erzeugten Lichtimpulse aufgrund der Frequenzverdopplung den technologisch interessanten Wellenlängenbereich um $1,55 \mu\text{m}$.

Aufgabe der Erfindung ist es demnach, eine Vorrichtung bereitzustellen, welche die rein faseroptische Erzeugung von Femtosekunden-Lichtimpulsen mit hoher Energie ermöglicht. Dabei sollen die auf die Frequenzverdopplung zurückzuführenden oben beschriebenen Nachteile soweit wie möglich vermieden werden.

Diese Aufgabe löst die Erfindung ausgehend von einer Vorrichtung der eingangs genannten Art dadurch, dass die Verstärkerfaser eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist, wobei die Verstärkerfaser nichtlineare optische Eigenschaften hat, derart, dass das optische Spektrum der Lichtimpulse unter Ausnutzung nichtlinearer Selbstphasenmodulation während des Verstärkungsvorgangs verbreitert wird.

Die wesentliche Grundidee der Erfindung ist der Einsatz eines optischen Streckers zum zeitlichen Strecken der Lichtimpulse in Kombination mit einer optisch gepumpten Verstärkerfaser mit positiver Gruppengeschwindigkeitsdispersion zur Verstärkung und gleichzeitigen zeitlichen Kompression der Lichtimpulse.

Aufgrund der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion der Verstärkerfaser wird das Auftreten von Solitonen mit nachteiligen zeitlich weit ausgedehnten Impulsflügeln verhindert. Außerdem bewirkt die positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion der Verstärkerfaser eine zeitliche Verkürzung der Lichtimpulse, wodurch die mit dem optischen Strecker erzielte zeitliche Streckung der Lichtimpulse kompensiert wird. Die während der Verstärkung der Lichtimpulse innerhalb der Verstärkerfaser gemäß der Erfindung auftretende nichtlineare Selbstphasenmodulation führt außerdem zur Verbreiterung des optischen Spektrums der Lichtimpulse, sodass im Ergebnis Lichtimpulse erzeugt werden können, die zeitlich kürzer sind als die von der Laserlichtquelle ursprünglich gelieferten Lichtimpulse. Durch optimale Anpassung der Länge der Verstärkerfaser der erfindungsgemäßen Vorrichtung stehen am Ausgang der Verstärkerfaser Lichtimpulse mit einer Impulsdauer von deutlich ≤ 100 Femtosekunden zur Verfügung. Somit ist ein komplett faserbasiertes Lasersystem realisierbar, das Femtosekunden-Lichtimpulse mit hoher Impulsenergie liefert.

Zweckmäßigerweise sollte bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung der optische Strecker der Verstärkerfaser vorgeschaltet sein, sodass - wie zuvor skizziert - die zeitliche Streckung der Lichtimpulse aufgrund der optischen Eigenschaften der Verstärkerfaser kompensiert wird. Dabei kann der optische Strecker mit Vorteil als optische Faser mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion ausgebildet sein. Es kann für die erfindungsgemäße Vorrichtung als optischer Strecker eine übliche Telekommunikationsglasfaser mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion verwendet werden. In Lasersystemen mit kurzwelliger Emission kann eine photonische Kristallfaser zur Erzielung der Streckung mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion dienen.

Als gepulste Laserlichtquelle kommt bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung sinnvollerweise ein System zum Einsatz, das fasergekoppelte Femtosekunden-Lichtimpulse mit einer Impulsenergie von bis zu 100 Pikojoule liefert. Derartige Systeme sind zu geringen Kosten kommerziell erhältlich.

Optional können die mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung verstärkten Lichtimpulse aus der Verstärkerfaser ausgekoppelt und im Freistrahle einem

optischen Kompressor zur weiteren zeitlichen Kompression zugeführt werden. Ein derartiger Kompressor, wie beispielsweise ein Prismenkompressor, ermöglicht eine präzise Justierung des zeitlichen Frequenzverhaltens der Lichtimpulse. Außerdem kann der Kompressor genutzt werden, um minimale Impulsdauern zu erzielen. Experimente haben gezeigt, dass sich mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung Lichtimpulse generieren lassen, die nicht die unerwünschten zeitlich weit ausgedehnten Impulsflügel aufweisen, wobei, wenn der Verstärkerfaser zusätzlich ein Prismenkompressor nachgeschaltet ist, die erzielbare Impulsdauer im Bereich von nur 65 Femtosekunden liegt. Die erzielbare Impulsenergie beträgt dabei 1,5 Nanojoule oder mehr.

Zweckmäßigerweise werden zum optischen Pumpen der Verstärkerfaser der erfindungsgemäßen Vorrichtung kommerziell erhältliche Laserdioden verwendet. Eine mit Erbium-Ionen dotierte Verstärkerfaser kann beispielsweise von ein oder zwei Laserdioden optisch gepumpt werden, die bei Wellenlängen von 980 nm oder 1480 nm arbeiten. Geeignete Laserdioden haben eine Leistungsaufnahme von weniger als einem Watt, sodass auf eine aufwendige Temperaturstabilisierung verzichtet werden kann. Insgesamt kann die erfindungsgemäße Vorrichtung also vorteilhafterweise mit einer elektrischen Leistung von wenigen Watt betrieben werden.

Es kann bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung also eine mit Erbium-Ionen oder mit anderen seltenen Erden (wie Nd, Er, Yb, Pr, Tm oder Ho) dotierte optische Faser als Verstärkerfaser eingesetzt werden. Dies hängt von der gewünschten Pumpeffizienz sowie von der Wellenlänge der zu verstärkenden Lichtimpulse ab.

Eine interessante Anwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung auf dem Gebiet der optischen Frequenzmetrologie ergibt sich, wenn die verstärkten Lichtimpulse in eine zusätzliche hoch-nichtlineare optische Faser eingekoppelt werden. Aufgrund der hohen Energie der Lichtimpulse kommt es in der zusätzlichen hoch-nichtlinearen optischen Faser zu extremen Nichtlinearitäten. Diese führen zu drastischen Modifikationen des optischen Spektrums der Lichtimpulse. Im Ergebnis werden Lichtimpulse erzeugt, deren Spektrum einem mehr als eine optische Oktave umfassenden optischen Frequenzkamm

entspricht. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung lässt sich ein optischer Frequenzkamm im Wellenlängenbereich von 950 nm bis 2 μ m generieren. Die Breite des optischen Frequenzkamms kann dabei durch geeignete Vorgabe der Länge der zusätzlichen hoch-nichtlinearen optischen Faser eingestellt werden.

5 Es ist bekannt, dass optische Frequenzkämme zum Vermessen von optischen Frequenzintervallen von großem Nutzen sind. Ein optischer Frequenzkamm besteht aus einer Vielzahl von Moden, die einen konstanten Abstand zueinander haben. Besonders breite optische Frequenzkämme lassen sich bekanntermaßen mit Laserlichtquellen erzeugen, die Femtosekunden-
10 Lichtimpulse emittieren. Ein solcher Laser schwingt gleichzeitig auf vielen Moden, die in einer festen Phasenbeziehung zueinander stehen. Der Abstand zwischen den einzelnen Moden entspricht der Wiederholungsrate, mit welcher die Lichtimpulse emittiert werden. Zur Charakterisierung eines optischen Frequenzkamms ist außerdem ein Offset-Frequenzwert zu berücksichtigen,
15 welcher die absolute Lage des Kamms im Frequenzraum bestimmt.

Zur Realisierung eines optischen Synthesizers für die optische Frequenzmetrologie ist die Erzeugung von optischen Frequenzkämmen erforderlich, die mehr als eine optische Oktave überspannen und eine genügend hohe Impulswiederholrate aufweisen. Erst eine volle optische Oktave ermöglicht
20 nämlich die einfache Bestimmung der erwähnten Offset-Frequenz und damit die vollständige Charakterisierung des optischen Frequenzkamms. Wenn der optische Frequenzkamm mehr als eine optische Oktave überspannt, so kann eine langwellige Mode des Frequenzkamms frequenzverdoppelt werden und mit einer korrespondierenden kurzwelligen Mode zur Schwebung gebracht werden.
25 Anhand der Schwebungsfrequenz kann dann der gesuchte Offset-Frequenzwert direkt ermittelt werden.

Dementsprechend weist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Charakterisierung des optischen Frequenzkamms zweckmäßigerweise ein der hoch-nichtlinearen Faser nachgeschaltetes Interferometer auf. Mit Hilfe des
30 Interferometers kann in der zuvor skizzierten Weise der Offset-Frequenzwert ermittelt werden. Zusammen mit der problemlos messbaren Wiederholungsrate der Laserlichtquelle ist dann der optische Frequenzkamm vollständig

charakterisiert, sodass die Vorrichtung zum hoch genauen Vermessen von optischen Frequenzintervallen genutzt werden kann.

Vorteilhafterweise besteht die Möglichkeit, zum Zweck der aktiven Stabilisierung ein Ausgangssignal des Interferometers der gepulsten Laserlichtquelle der erfindungsgemäßen Vorrichtung zuzuführen. Damit kann insbesondere der angesprochene Offset-Frequenzwert auf einen gewünschten Wert aktiv stabilisiert werden. Das Spektrum des erzeugten optischen Frequenzkamms ist damit absolut kalibriert, sodass insgesamt eine selbst-referenzierte gezielte Synthese von optischen Frequenzen mit hoher Stabilität möglich ist. Dabei liegt der erzeugte optische Frequenzkamm im Bereich der Telekommunikationswellenlängen, sodass die erfindungsgemäße Vorrichtung ein großes Anwendungspotenzial hat.

Eine sinnvolle Weiterbildung der erfindungsgemäßen Vorrichtung besteht darin, dass ein zweiter optischer Verstärker vorgesehen ist, welchem ein Teil des von der gepulsten Laserlichtquelle emittierten Lichts zugeführt wird. Die in der zuvor beschriebenen Weise aktiv stabilisierte Laserlichtquelle speist dabei gleichzeitig zwei optische Verstärker, wobei der zweite optische Verstärker an die jeweilige Anwendung individuell angepasst sein kann. Über den zweiten optischen Verstärker können somit Lichtimpulse ausgegeben werden, deren Spektrum einem stabilisierten und genau charakterisierten optischen Frequenzkamm entspricht. Optional kann dem zweiten optischen Verstärker ein Frequenzkonverter, z.B. ein Frequenzverdoppler, nachgeschaltet sein, um den Wellenlängenbereich je nach Bedarf zu vergrößern.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im Folgenden anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 schematische Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 2 schematische Darstellung eines Interferometers zur Charakterisierung eines optischen Frequenzkamms;

Fig. 3

erfindungsgemäße Vorrichtung mit zwei optischen Verstärkern.

Die in der Fig. 1 dargestellte Vorrichtung weist eine gepulste Laserlichtquelle 1 auf. Diese liefert fasergekoppelte Femtosekunden-Lichtimpulse geringer Leistung. Bei Experimenten hat sich eine Laserlichtquelle bewährt, die Lichtimpulse mit einer Impulsenergie von 45 Pikojoule bei einer Wiederholungsrate von 67 MHz emittiert. Eine für die erfindungsgemäße Vorrichtung verwendbare rein faserbasierte Laserlichtquelle ist z. B. in dem Artikel von Tamura et al. in Optics Letters, Band 18, Seite 1080, 1993, beschrieben. Die von der Laserlichtquelle 1 emittierten Lichtimpulse werden in eine handelsübliche Telekommunikationsglasfaser 2 eingekoppelt. Diese hat eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion (z. B. $-0,023 \text{ ps}^2/\text{m}$) und fungiert bei der dargestellten Vorrichtung als optischer Strecker, in welchem die Lichtimpulse der gepulsten Laserlichtquelle 1 zeitlich gestreckt werden. Die gestreckten Lichtimpulse durchlaufen dann eine optisch gepumpte Verstärkerfaser 3, bei welcher es sich um eine mit Erbium-Ionen hoch dotierte (500 bis 1000 ppm) optische Faser handelt. Gemäß der Erfindung weist die Verstärkerfaser 3 eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion (z. B. $+0,057 \text{ ps}^2/\text{m}$) auf, sodass das Auftreten von solitonischen optischen Effekten in der Verstärkerfaser 3 vermieden wird. Die Dotierung der Verstärkerfaser 3 ist derart, dass sich ohne optisches Pumpen eine Abschwächung des die Faser durchlaufenden Lichts (Wellenlänge $1,5 \mu\text{m}$) um 80 Dezibel pro Meter ergibt. Die Verstärkerfaser 3 wird bei der in der Fig. 1 dargestellten Vorrichtung von zwei Laserdioden 4 gepumpt, die bei einer Wellenlänge von 980 nm oder 1480 nm arbeiten. Bei Experimenten wurden Laserdioden mit einer Ausgangsleistung von je 200 mW verwendet. Das Licht der Laserdioden wird in die Verstärkerfaser 3 über so genannte WDM-Koppler 5 eingekoppelt. Die Verstärkerfaser 3 hat nichtlineare optische Eigenschaften, was dazu führt, dass während des Verstärkungsvorgangs das optische Spektrum der mittels der Faser 2 zeitlich gestreckten Lichtimpulse unter Ausnutzung nichtlinearer Selbstphasenmodulation verbreitert wird. Aufgrund der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion der Verstärkerfaser 3 werden die zuvor mittels der Faser 2 gestreckten Lichtimpulse außerdem zeitlich komprimiert. Am Ausgang der Verstärkerfaser 3 stehen dann Lichtimpulse zur Verfügung, deren Impulsdauer

≤ 100 Femtosekunden beträgt. Um das Auftreten übermäßiger Nichtlinearitäten zu vermeiden, werden die Lichtimpulse nach dem Verstärkungsvorgang aus der Verstärkerfaser 3 mittels einer Linse 6 ausgekoppelt. Zwei Wellenplättchen 7 und 8 sind vorgesehen, um einen horizontalen Polarisationszustand der Lichtimpulse einzustellen. Alternativ könnte auch ein faseroptischer Polarisationssteller verwendet werden. Anschließend werden die Lichtimpulse in einem zweifach durchlaufenen Silizium-Prismen-Kompressor 9 auf eine minimale Impulsdauer komprimiert. Zur Vermeidung von Reflexionsverlusten innerhalb des Prismenkompressors 9 sind die Prismen unter dem Brewster-Winkel angeordnet. Bei Experimenten ließen sich am Ausgang der dargestellten Vorrichtung Lichtimpulse mit einer Impulsdauer von 65 Femtosekunden bei einer Impulsenergie von 1,5 Nanojoule erzielen. Bei einer Wiederholungsfrequenz von 67 MHz entspricht dies einer mittleren Ausgangsleistung von 110 mW. Anstelle des Prismenkompressors wäre ohne weiteres auch der Einsatz eines Gitterkompressors, so genannter „gechirpter“ Spiegel oder eines so genannten Faser-Bragg-Gitters möglich.

Die Fig. 2 zeigt eine optionale Erweiterung der erfindungsgemäßen Vorrichtung durch eine zusätzliche hoch-nichtlineare optische Faser 10, in welche die verstärkten Lichtimpulse zur Erzeugung eines mehr als eine optische Oktave umfassenden optischen Frequenzkammes eingekoppelt werden. Zur Einkopplung in die zusätzliche Faser 10 ist eine Linse 11 vorgesehen. Mittels einer weiteren Linse 12 werden die mittels der Faser 10 modifizierten Lichtimpulse ausgekoppelt. Genauso gut wäre es aber – je nach Anwendungsfall – auch möglich, die Lichtimpulse aus der Verstärkerfaser 3, z.B. mittels einer geeigneten Spleißverbindung, direkt der hoch-nichtlinearen Faser 10 zuzuführen. Bei der hoch-nichtlinearen optischen Faser kann es sich um eine Glasfaser mit einem sehr geringen Kerndurchmesser von $\leq 5\mu\text{m}$ handeln. Bei Experimenten wurde eine Glasfaser mit einem Kerndurchmesser von $3,7\mu\text{m}$ erfolgreich eingesetzt, um einen mehr als eine optische Oktave umfassenden optischen Frequenzkamm zu erzeugen. Bei Wellenlängen von weniger als $1,3\mu\text{m}$ ist die Verwendung von mikrostrukturierten photonischen Kristallfasern an sich bekannter Art als hoch-nichtlineare Faser 10 vorteilhaft. In der Faser 10 treten extreme nichtlineare optische Effekte auf, die zu starken Modifikationen des optischen Spektrums der Lichtimpulse führen. Nach weniger als 10 cm

Laufstrecke in der Faser 10 erstreckt sich das optische Spektrum von etwa 950 nm bis etwa 2 μm . Damit weist das erzeugte Kontinuum eine Bandbreite von mehr als einer Oktave auf. Bei Experimenten wurde eine 7 cm lange hoch-nichtlineare Faser 10 eingesetzt. Bei einer größeren Faserlänge nimmt die

 5 Effektivität der nichtlinearen Prozesse zum Ausgang der Faser 10 hin ab, und es kommt nicht zu einer weiteren Verbreiterung des Spektrums. Wird das Faserstück 10 kürzer gewählt, so ist das Spektrum des erzeugten optischen Frequenzkamms schmäler. Über eine Längenänderung des Faserstücks 10 kann also das Spektrum der austretenden Lichtimpulse in gewissen Grenzen

 10 kontinuierlich verstimmt werden. Zur Charakterisierung des optischen Frequenzkamms und insbesondere des Offset-Frequenzwertes, der die absolute Lage des Frequenzkamms im Frequenzraum bestimmt, dient das in der Fig. 2 dargestellte Interferometer 13. Langwelligen Moden des Frequenzkamms werden zunächst in einem optisch nichtlinearen Kristall 14

 15 (z.B. β -Bariumborat) frequenzverdoppelt, sodass ein spektraler Überlapp mit dem kurzwelligen Bereich des optischen Spektrums entsteht. Das frequenzverdoppelte Licht wird mittels eines polarisierenden Strahlteilers 15 räumlich abgetrennt. Um Laufzeitunterschiede innerhalb der hoch-nichtlinearen Faser 10 auszugleichen sind in einem Arm des dargestellten Interferometers

 20 Spiegel 16 vorgesehen, die eine variable optische Verzögerungsstrecke bilden. Über weitere Spiegel 17 und einen zweiten polarisierenden Strahlteiler 18 werden die Lichtstrahlen nach Passieren eines Interferenzfilters 19 und eines Polarisators 20 auf einer Silizium-Avalanche-Photodiode 21 zur Überlagerung gebracht. Mittels der Photodiode 21 wird ein Schwebungssignal detektiert. Aus

 25 dem Radiofrequenzspektrum des Schwebungssignals lassen sich direkt die Wiederholungsrate der Laserlichtquelle sowie der interessierende Offset-Frequenzwert ermitteln.

Die Fig. 3 zeigt in Form eines Blockschaltbildes die Erweiterung der erfindungsgemäßen Vorrichtung zu einem zweiarmigen optischen

 30 Verstärkerkonzept. Bei der in der Fig. 3 dargestellten Vorrichtung speist die gepulste Laserlichtquelle 1 zwei Verstärker. Der Verstärker 22 hat dabei im Wesentlichen den in der Fig. 1 dargestellten Aufbau. Dem Verstärker 22 ist eine optische Messanordnung 23 nachgeschaltet, mittels welcher das optische Spektrum der verstärkten Lichtimpulse charakterisiert wird. Die

Messanordnung 23 kann ein Interferometer 13, wie es in der Fig. 2 dargestellt ist, umfassen. Zum Zwecke der aktiven Stabilisierung wird ein Ausgangssignal 24 der Messanordnung 23 der gepulsten Laserlichtquelle 1 zugeführt. Des Weiteren ist ein zweiter optischer Verstärker 25 vorgesehen, der
5 je nach Anwendungsfall ausgelegt sein kann, z. B. kann der zweite optische Verstärker 25 auf möglichst kurze Ausgangsimpulse oder auf maximale Impulsenergie optimiert sein. Die Kammstruktur des optischen Spektrums der Lichtimpulse aus der gepulsten Laserlichtquelle 1 geht bei der Verstärkung und
10 bei gegebenenfalls nachfolgenden Frequenzumwandlungsprozessen nicht verloren. Beispielsweise über eine Wellenlängenkonversion in einer weiteren hoch-nichtlinearen optischen Faser 26, gegebenenfalls in Kombination mit einem Frequenzverdoppler, kann die Vorrichtung so erweitert werden, dass am
15 Ausgang exakt charakterisierte und stabilisierte Frequenzkämme mit hoher Leistung im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 2 μ m lückenlos zur Verfügung stehen.

- Ansprüche -

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Verstärkung von Lichtimpulsen, mit einem optischen Strecker (2), in welchem die Lichtimpulse einer gepulsten Laserlichtquelle (1) zeitlich gestreckt werden, und mit einer optisch gepumpten Verstärkerfaser (3), in welcher die Lichtimpulse verstärkt und zeitlich komprimiert werden, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Verstärkerfaser (3) eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist, wobei die Verstärkerfaser (3) nichtlineare optische Eigenschaften hat, derart, dass das optische Spektrum der Lichtimpulse unter Ausnutzung nichtlinearer Selbstphasenmodulation während des Verstärkungsvorgangs verbreitert wird.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Strecker (2) der Verstärkerfaser (3) vorgeschaltet ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Strecker (2) als optische Faser mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion ausgebildet ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gepulste Laserlichtquelle (1) fasergekoppelte Femtosekunden-Lichtimpulse mit einer Impulsenergie von bis zu 100 Pikojoule liefert.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die verstärkten Lichtimpulse aus der Verstärkerfaser (3) ausgekoppelt und einem

optischen Kompressor (9) zur weiteren zeitlichen Kompression zugeführt werden.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch wenigstens eine Laserdiode (4) zum optischen Pumpen der Verstärkerfaser (3).

5 7. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine zusätzliche hoch-nichtlineare optische Faser (10), in welche die verstärkten Lichtimpulse zur Erzeugung eines mehr als eine optische Oktave umfassenden optischen Frequenzkamms eingekoppelt werden.

10 8. Vorrichtung nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch ein der hoch-nichtlinearen optischen Faser (10) nachgeschaltetes Interferometer (13) zur Charakterisierung des optischen Frequenzkamms.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass zum Zweck der aktiven Stabilisierung ein Ausgangssignal (24) des Interferometers (13) der gepulsten Laserlichtquelle (1) zugeführt wird.

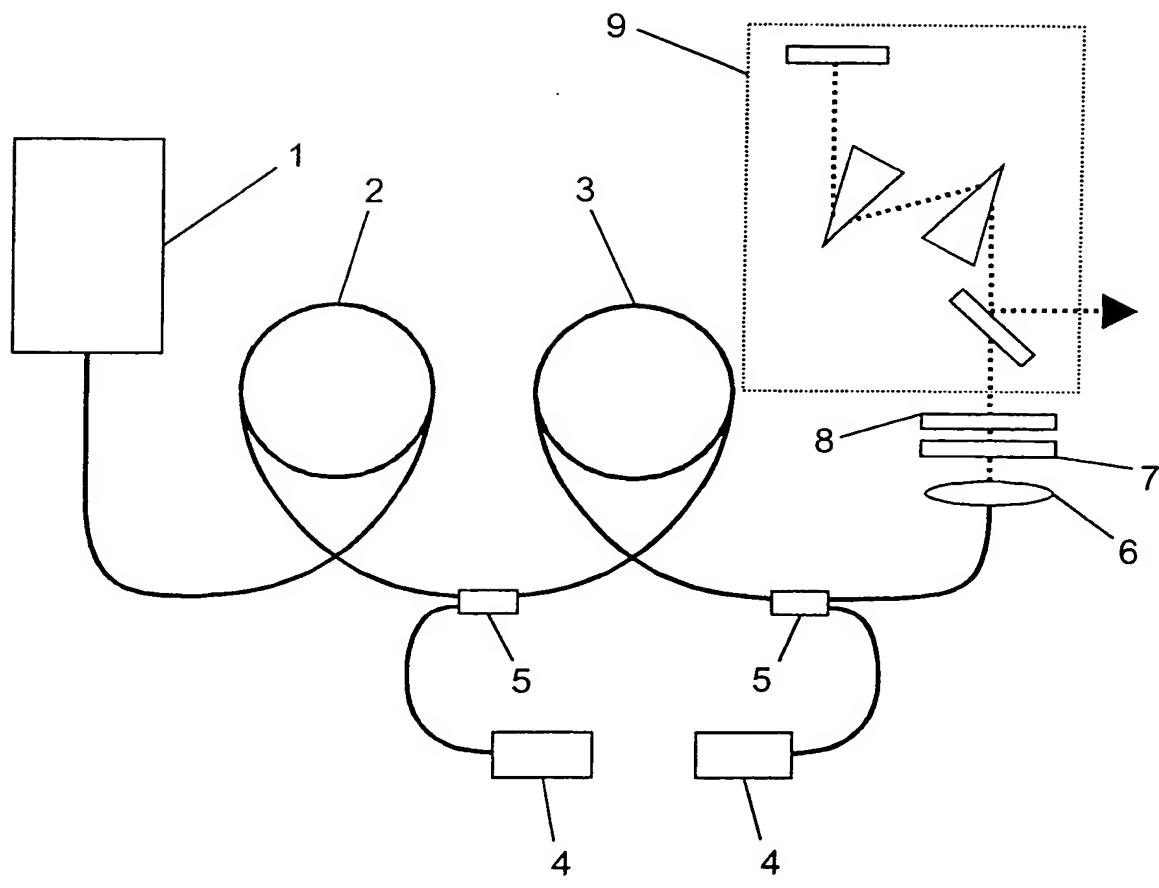
15 10. Vorrichtung nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch einen zweiten optischen Verstärker (25), welchem ein Teil des von der gepulsten Laserlichtquelle (1) emittierten Lichts zugeführt wird.

- Zusammenfassung -

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Verstärkung von Lichtimpulsen, mit einem optischen Strecker (2), in welchem die Lichtimpulse einer gepulsten
5 Laserlichtquelle (1) zeitlich gestreckt werden, und mit einer optisch gepumpten Verstärkerfaser (3), in welcher die Lichtimpulse verstärkt und zeitlich komprimiert werden. Zur Verbesserung eines derartigen Systems hinsichtlich der erreichbaren Impulsdauer und der Impulsenergie schlägt die Erfindung vor, dass die Verstärkerfaser (3) eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion
10 aufweist, wobei die Verstärkerfaser (3) nichtlineare optische Eigenschaften hat, derart, dass das optische Spektrum der Lichtimpulse unter Ausnutzung nichtlinearer Selbstphasenmodulation während des Verstärkungsvorgangs verbreitert wird.

Fig. 1



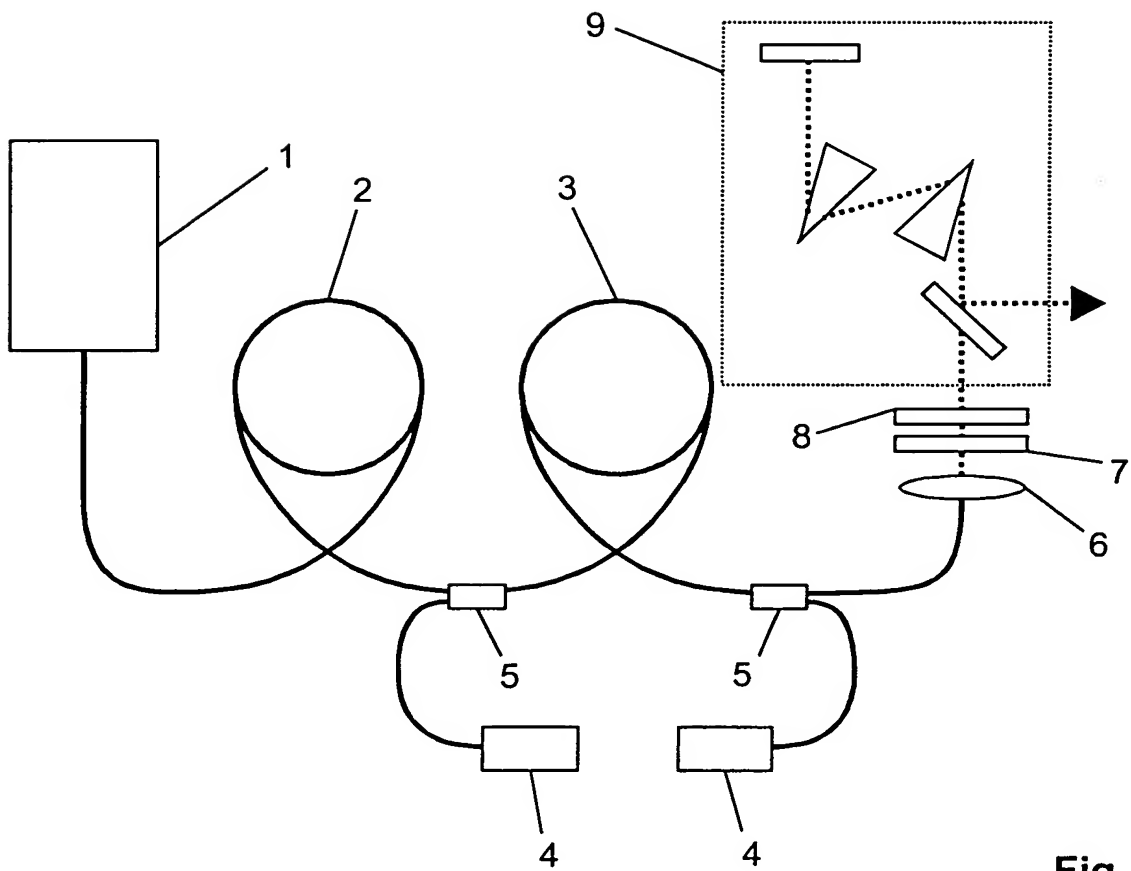


Fig. 1

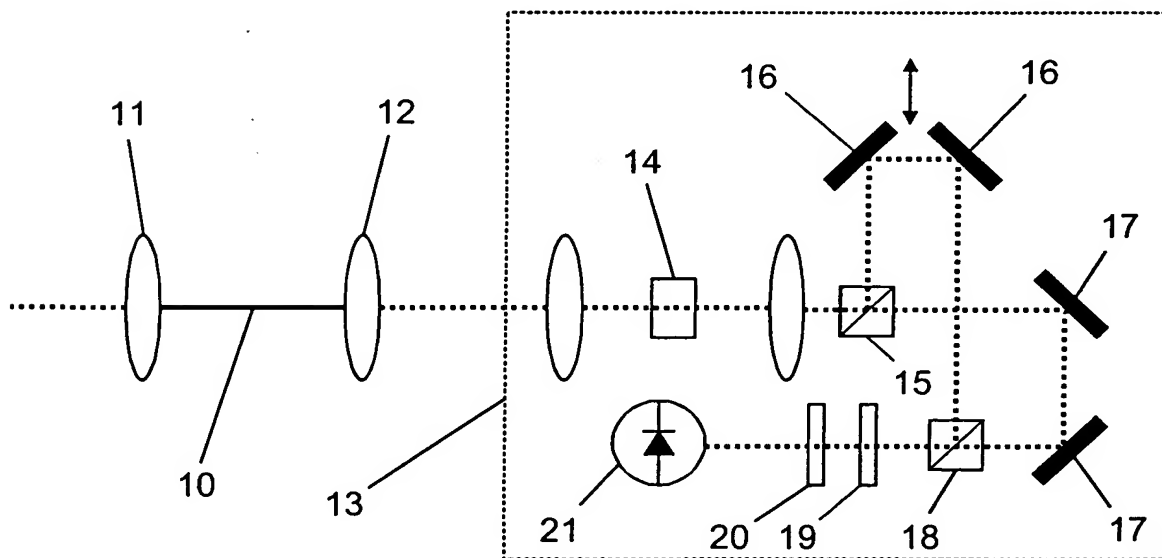


Fig. 2

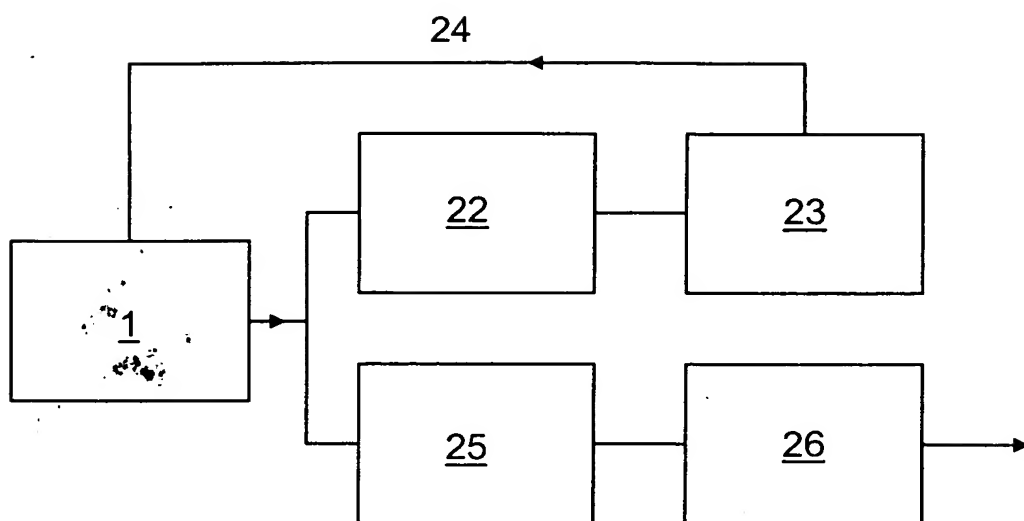


Fig. 3